

## 衝突荷重を受けるRC版の局部破壊特性に関する考察

Investigation of local failure characteristics of RC slabs subjected to impact force due to collision

片岡新之介\*, 別府万寿博\*\*, 市野宏嘉\*\*\*

Shinnosuke Kataoka, Masuhiro Beppu, Hiroyoshi Ichino

\*修(工), 防衛大学校, 理工学研究科後期課程(〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

\*\*博(工), 防衛大学校教授, 建設環境工学科(〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

\*\*\*博(工), 防衛大学校准教授, 建設環境工学科(〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

*Key Words: projectile impact, impact force, RC slab, local failure characteristics*

キーワード: 飛来物衝突, 衝突荷重, RC版, 局部破壊特性

### 1. 緒言

近年, 竜巻における飛来物や火山噴火において飛散する火山噴石の衝突による被害が報告されている. 2013年に茨城県常総市で発生した竜巻においては, 竜巻によって巻き上げられた物体(竜巻飛来物)が構造物へ衝突して被害が生じた事例が報告されており, このような飛来物が原子力施設などの重要構造物に衝突する事態が懸念されている<sup>1)2)</sup>. また, 2014年に発生した御嶽山の火山噴火では, 火山噴石の衝突によって多くの人命が失われており, 火山噴石に対する退避シェルターの設計法の確立が求められている<sup>3)</sup>. なお, これらの飛来物の衝突速度は40m/s~150m/s程度と想定されている<sup>2)3)</sup>.

飛来物の衝突を受ける鉄筋コンクリート(RC)版に関する研究は過去に多く行われており, 比較的衝突速度の低いケース(衝突速度10m/s以下)や高速度の衝突(200m/s以上)に対する研究が多い<sup>4)</sup>. 衝突速度が低いケースにおいては, 静的な破壊現象と同様な曲げ破壊や押抜きせん断破壊のような全体破壊が生じることが知られている. 一方で, 衝突速度が大きい場合には, RC版に表面破壊・貫入, 裏面剥離および貫通の局部破壊が生じることが知られている<sup>4)</sup>. また, 局部破壊に対しては, 貫入深さ, 裏面剥離および貫通限界版厚を求める評価式が多く提案されている<sup>5)</sup>. しかし, これらの式による評価値には比較的大きな差異があることが指摘されており, 衝突条件における各要因が実験結果にどのような影響を及ぼすのかについても明らかではない<sup>5)</sup>. また, 竜巻飛来物や火山噴石のような速度帯の衝突を受ける場合の破壊モードや衝撃応答については不明な点が多い. したがって, 衝突荷重を受けるRC版の衝撃応答を

詳細に分析し, RC版の破壊メカニズムを解明することが求められる.

本研究は, 衝突を受けるRC版の破壊特性について考察を行ったものである. まず, RC版の衝撃応答を調べるため, 著者らが過去に行ったRC版に対する鋼製飛翔体の衝突実験<sup>6)</sup>について数値解析を行った. 次に, 飛翔体の運動とRC版の衝撃応答の比較から, 衝突荷重を受けてRC版に生じる破壊特性を考察した.

### 2. 衝突実験の再現解析

#### 2.1 解析の概要

衝突によってRC版内部に生じる破壊のメカニズムを調べるため, 衝突実験に関する数値解析を行った. 解析は, 汎用の衝撃解析コードであるANSYS AUTODYN Ver.16を用いて行った. 図-1に, 解析モデルを示す. 実験条件のモデル化については, 計算時間の短縮を図るために対称性を考慮し, 1/4モデルを作成した. 飛翔体およびRC版については六面体要素により要素分割を行い, 裏面支持具についてはシェル要素により分割してモデル化した. コンクリート要素の要素寸法については5mm×5mm×5mmとした. 総節点数および総要素数はそれぞれ308025および290400であった. 鉄筋ははり要素でモデル化し, 要素長5mmで分割してコンクリート要素との節点を完全結合した. 境界条件については, 実験においてボルトで固定した表面鋼材の位置の節点を固定した. また, 裏面支持具のロードセルの位置の面内(x, y方向)および衝突方向(z方向)の変位を固定した. 初期条件としては, 飛翔体の全節点に衝突速度を与えた.

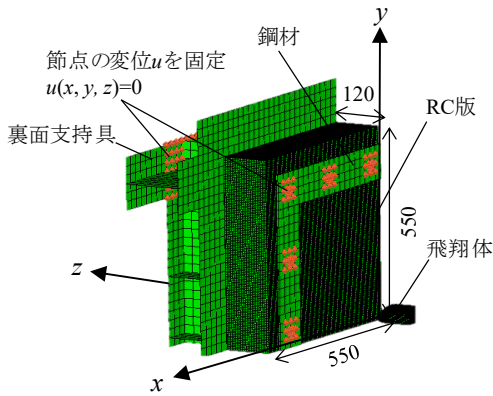


図-1 解析モデル

コンクリートの構成則については図-2 に示す非線形 Drucker-Prager 型の降伏関数を適用し、破壊の判定については図-3 に示すように負圧による破壊判定を行った。非線形 Drucker-Prager 型の降伏関数を、式(1)に示す<sup>7)</sup>。

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{f'_{cd} f'_{td} - (f'_{td} - f'_{td}) I_1}{3}} \quad (1)$$

ここに、 $\sigma_y$  は降伏応力、 $f'_{cd}$  は静的圧縮強度、 $f'_{td}$  は動的引張強度、 $I_1$  は応力の1次不変量である。

表-1 に、それぞれの材料の解析定数を示す。コンクリートのモデルでは、要素の大変形による計算の中断を回避するため、エロージョンひずみを基準として要素削除を行った。コンクリートの動的圧縮および引張強度については、それぞれ以下に示す藤掛らの式<sup>8)</sup>および Ross らの式<sup>9)</sup>を用いており、実験における裏面のひずみ～時間関係から得られるひずみ速度を参考にして、ひずみ速度  $10^6 \text{ s}^{-1}$  における強度倍率を算定し、静的強度に乗じて求めた。

$$\frac{f'_{cd}}{f'_{cs}} = \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{0.006 \left[ \log \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right) \right]^{1.05}} \quad (2)$$

$$\frac{f'_{td}}{f'_{ts}} = \exp \left[ 0.00126 \left( \log \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{3.373} \right] \quad (3)$$

ここに、 $\dot{\epsilon}_s$  は静的ひずみ速度 ( $10^6 \text{ s}^{-1}$ )、 $\dot{\epsilon}$  はひずみ速度、 $f'_{cs}$  は静的圧縮強度、 $f'_{ts}$  は静的引張強度である。

鉄筋の構成則については、温度の影響を無視した式(4)に示す Johnson-Cook モデル<sup>10)</sup>を適用し、破壊は生じないモデルとした。

$$\sigma = \left( \sigma_y + B \epsilon_p^n \right) \left( 1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \quad (4)$$

ここに、 $\sigma_y$  は降伏応力、 $\epsilon_p$  は相当塑性ひずみ、 $\dot{\epsilon}_0$  は基準ひずみ速度、 $B$ 、 $C$ 、 $n$  は定数であり、文献<sup>10)</sup>を参考に決定した。

飛翔体および裏面支持具の鋼材の構成則については、実験後に破壊や残留変形が生じなかったことから、完全弾性体とした。解析ケースについては、表面破壊、裏面剥離限界および裏面剥離の3種類の破壊モードが得られた版厚 12cm の実験について数値シミュレーションを

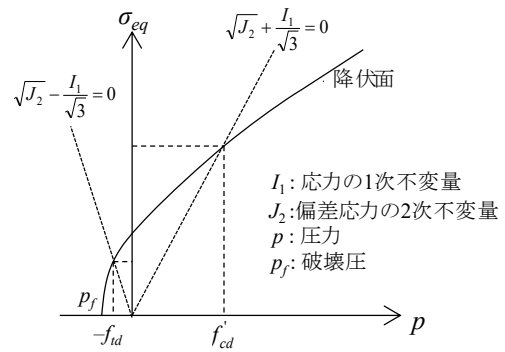


図-2 非線形 Drucker-Prager 型降伏関数<sup>7)</sup>

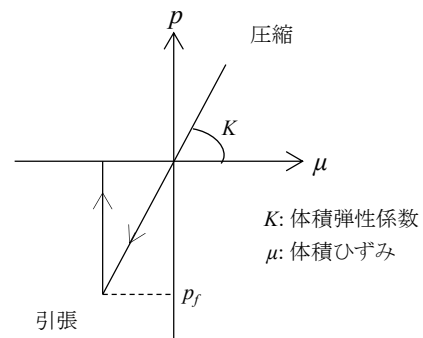


図-3 負圧破壊則<sup>7)</sup>

表-1 解析定数

材料	解析定数	記号	入力値	単位
コンクリート	ヤング係数	$E$	25	$\text{kN/mm}^2$
	ポアソン比	$\nu$	0.2	-
	静的圧縮強度	$f'_{cs}$	30	$\text{N/mm}^2$
	動的圧縮強度	$f'_{cd}$	50.9	$\text{N/mm}^2$
	静的引張強度	$f'_{ts}$	2.2	$\text{N/mm}^2$
	動的引張強度	$f'_{td}$	9.0	$\text{N/mm}^2$
	破壊圧	$p_f$	-6.0	$\text{N/mm}^2$
	エロージョンひずみ	$\epsilon_{eff}$	2.5	-
鉄筋	ヤング係数	$E$	216	$\text{kN/mm}^2$
	ポアソン比	$\nu$	0.3	-
	硬化定数	$B$	592	$\text{N/mm}^2$
	ひずみ速度に関する係数	$C$	0.017	-
	硬化に関する係数	$n$	0.228	-
	降伏応力	$\sigma_y$	409	$\text{N/mm}^2$
飛翔体裏面支持具	ヤング係数	$E$	200	$\text{kN/mm}^2$

行った。

## 2.2 解析結果

図-4 に、飛翔体の変位、速度および衝突荷重～時間関係を示す。実験データの速度および衝突荷重は、原波

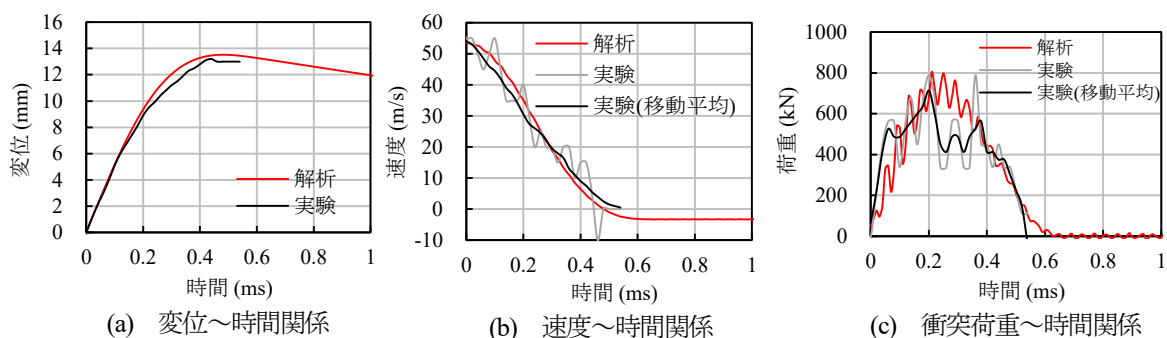


図-4 飛翔体の変位，速度および衝突荷重～時間関係

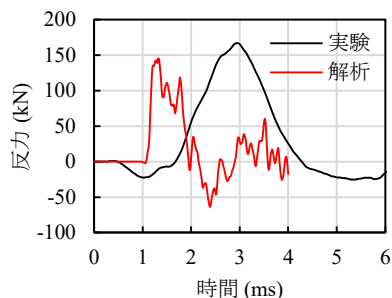


図-5 RC版の支点反力～時間関係

形を灰色，移動平均法（11 区間）による処理波形を黒で示し，解析結果は赤で示している．実験における衝突荷重については以下に示す手順で算定した<sup>6)</sup>．まず，衝突前後の飛翔体を高速カメラで撮影（サンプリングレート：50000 フレーム/秒）し，変位画像を解析することによって変位～時間関係を求めた．次に，この変位～時間関係を時間について 2 回微分することによって算出した加速度に飛翔体の質量を乗じることで衝突荷重を算出している．解析においても実験と同様に飛翔体の加速度に質量を乗じることで求めた．図-4 に示す解析と実験結果の比較から，解析による飛翔体の変位，速度および衝突荷重～時間関係は，実験結果と同様の波形を描いており，本解析は飛翔体の変位や荷重の特性に関して実験結果をある程度再現したと考えられる．

図-5 に，RC 版の支点反力～時間関係を示す．解析結果の支点反力は，裏面支持具モデルの固定した節点の衝突方向（図-1 における z 軸方向）に生じる節点力を出し，4 倍することで算定した．なお，実験による支点反力は約 6.0ms 程度まで生じているが，飛翔体による衝突荷重は時刻約 0.5ms で除荷されていた．また，支点反力は約 3.0ms で最大値に達した後に急激に減少したことを考慮し，計算時間を短縮するため解析は時刻 4.0ms まで行った．図から，解析による最大支点反力の値は約 150kN 前後で実験結果とほぼ同様であった．ただし，実験結果では時刻約 3.0ms で最大支点反力が生じたが，解析では時刻約 1.4ms で最大値を示した．このように解析と実験で支点反力が生じる時刻が異なる理由は，実験ではロードセルのモデルを簡略化したこと，また RC 版を

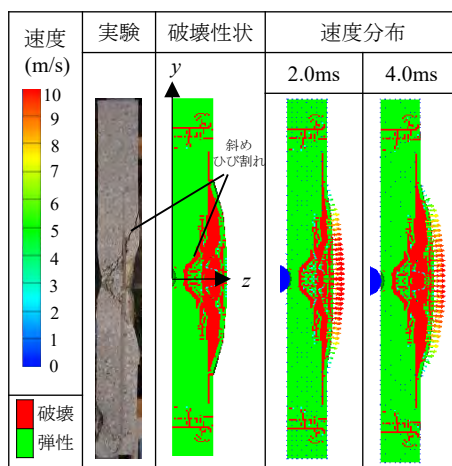


図-6 RC 版断面の破壊性状および速度分布

固定しているボルトをモデル化せずに節点を固定したこと等が影響したと考えられ，今後詳細に確認する必要がある．ただし，解析結果も実験結果と同様に，衝突荷重が概ね除荷された後に支点反力が生じる傾向を示した．

図-6 に，実験後の RC 版試験体を中央で切断した断面の写真と，解析によって得られた RC 版断面の破壊性状および速度分布を示す．RC 版の解析モデルは，衝突方向（z 軸方向）について対称に表示している．解析結果の破壊性状については設定した負圧に達して破壊した要素を赤，弾性状態の要素を緑で表示し，速度の大きさは表の左側に表示している色調（青：速度ゼロ，赤：速度 10m/s）で表示している．

実験における RC 版は，衝突部から裏面に向かって斜めひび割れが生じ，裏面のかぶり部分のコンクリートが飛散している．一方，解析結果では斜めひび割れの内側に位置する裏面側の要素の大部分が破壊と判定され，裏面の主にかぶり部分における要素が z 軸方向に大きく変位した．また，速度分布については，同じく裏面のかぶり部分の要素が衝突方向に 10m/s 以上の速度を示している．このことから，実験において裏面のかぶり部分のコンクリートが飛散したことを解析により再現したものと考えられる．

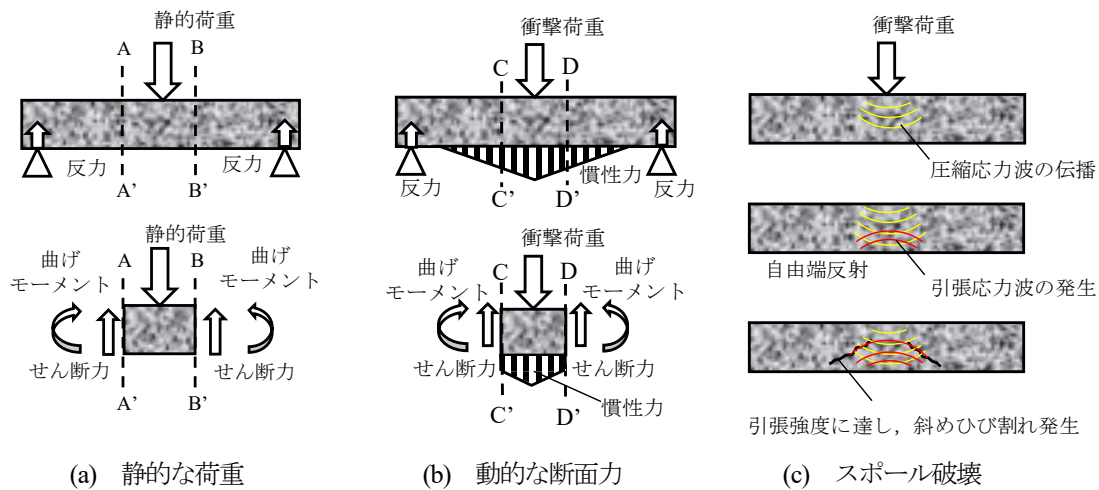


図-7 RC 部材の自由物体における力の釣合いおよび断面力

### 3. RC 版に生じる局部破壊の特性

本章では、前章で行った解析結果を用いて RC 版の衝撃応答について考察し、RC 版の破壊メカニズムに関する検討を行う。図-7 に、荷重が作用する RC 版の応答の模式図を示す。一般に、RC 版に静的な荷重が作用すると図-7(a)に示すように支点反力が発生し、荷重と支点反力が釣合うとともに RC 版断面には曲げモーメントやせん断力が生じる。一方で、衝撃荷重が作用する場合は、図-7(b)に示すように衝撃荷重、慣性力および支点反力により衝突方向の力の釣合いが成立し、RC 版の断面には曲げモーメントやせん断力が生じるとされている<sup>12)</sup>。また、ある衝突条件下においては、図-7(c)に示すように衝突によって生じる圧縮応力波が RC 版内を伝播し、自由表面である裏面に到達すると自由端反射をすることで引張応力波が生じ、コンクリートの引張強度に達することで斜めひび割れが進展するスポール破壊が生じると説明されている<sup>13)</sup>。以下では、数値シミュレーション結果に基づいて衝突荷重を受けた RC 版の力の釣合い、断面力および応力波の伝播について考察を行う。

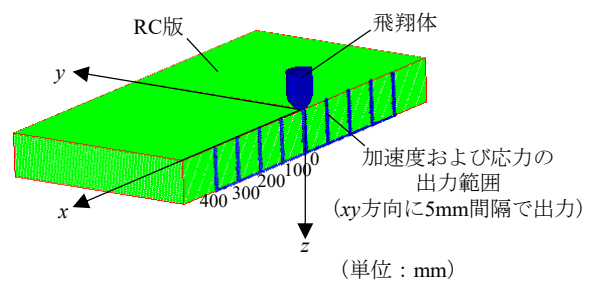


図-8 RC 版の加速度および応力の出力点

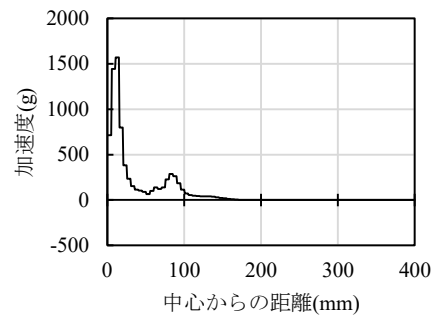


図-9 衝突方向の代表加速度

#### 3.1 慣性力およびせん断力の算出

図-8 に、RC 版の加速度および応力の出力点を示す。RC 版の断面に生じる慣性力および断面力の分布を得るため、図中の x 軸方向に 5mm 間隔 (1 要素間隔) の断面を選択し、この断面内の高さ方向 (z 方向) における 5mm 間隔 (25 点) の解析結果を出力した (図中は 100mm 間隔の出力点のみを青点により表示)。

加速度については各断面における衝突方向の加速度の平均値を求め、図-9 に示すようにそれらの 2 断面間の平均値を代表加速度とした。次に、図-10 に示すように RC 版を 5mm ごとに円盤状に分割して体積を算定し、コンクリートの密度を乗じることで質量を求めた。この円盤の質量を、それぞれの断面の代表加速度に乘じ

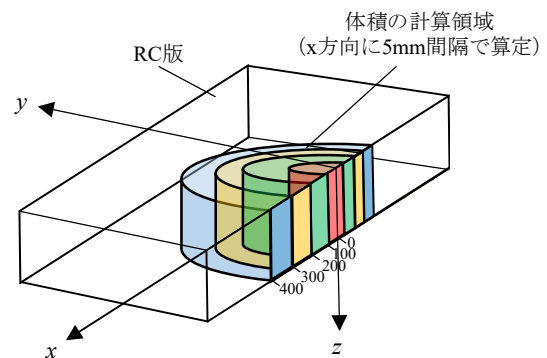


図-10 RC 版の質量の計算領域

て慣性力分布を算定した (図中は 100mm 間隔の円盤のみを表示)。

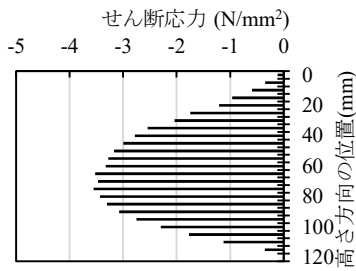


図-11 せん断応力分布

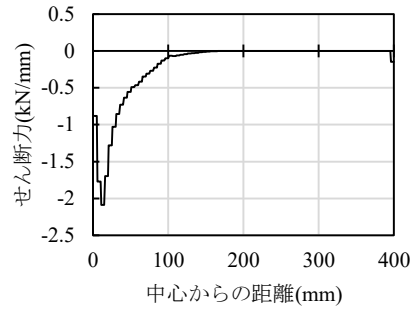


図-12 単位長さあたりのせん断力分布

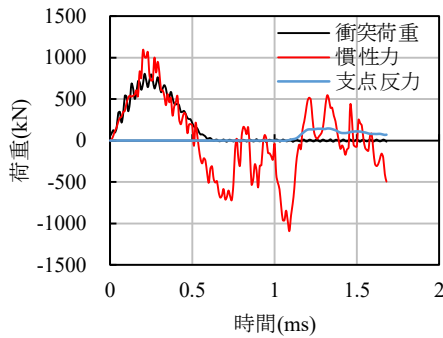


図-13 衝突荷重、慣性力および支点反力～時間関係

せん断力については、図-11 に示すせん断応力を断面の高さ方向に積分して図-12 に示す単位長さあたりのせん断力を求め、加速度と同様に2断面間の平均値を算定した。さらに、この単位長さあたりのせん断力に図-10 に示す円盤状の領域の出力断面間隔 (5mm) ごとの円盤の周長を乗じることでせん断力分布を算定した。

### 3.2 RC版における力の釣合い

図-13 に衝突荷重、慣性力および支点反力～時間関係を示す。衝突荷重は時刻約0.2msで最大値約700kNを示した後、時刻約0.5msで除荷されている。一方で、慣性力～時間関係は時刻0.5msまでは衝突荷重とほぼ同様の波形を示しており、衝突荷重と慣性力が釣合うことを示している。その後、荷重が除荷された後は慣性力が振動し、支点反力は時刻約1.1ms以降に生じている。

### 3.3 ひび割れの進展状況およびせん断力

衝突部直後から断面のひび割れが形成される間のひび割れの進展状況を図-14 に示す。なお、要素の色については図-6 の色に加え、塑性化した要素を水色で表している。衝突直後の時刻0.05msにおいては、衝突部近傍の要素は塑性化しているが、破壊が生じた要素はなかった。ここで、衝突によって生じる弾性応力波の3次元伝播速度は、式(4)によって算定される<sup>14)</sup>。

$$c = \sqrt{\frac{(1-\nu)\rho}{(1-2\nu)(1+\nu)E}} \quad (4)$$

ここに、 $c$ は弾性波速度、 $E$ は被衝突体のヤング係数、 $\rho$

時間(ms)	ひび割れ進展性状
0.05	RC版の裏面に飛翔体（塑性領域）が到達する。x, z軸方向を示す。
0.1	飛翔体の先端がRC版の裏面に到達し、ひび割れが開始する。
0.2	斜めひび割れの発生が顕著になる。
0.4	斜めひび割れがRC版の断面を貫通し、ひび割れが進展する。
0.6	ひび割れがRC版の断面を貫通し、ひび割れが進展する。
0.8	ひび割れがRC版の断面を貫通し、ひび割れが進展する。
1.0	ひび割れがRC版の断面を貫通し、ひび割れが進展する。

図-14 RC版のひび割れの進展

は被衝突体の密度、 $\nu$ は被衝突体のポアソン比である。

参考のため、コンクリートのヤング係数を  $E = 25\text{kN/mm}^2$ 、密度を  $\rho = 2300\text{kg/m}^3$ 、ポアソン比を  $\nu = 0.2$  とすると、コンクリートの弾性波速度は  $c \approx 3475\text{m/s}$  となる。また、版厚は12cmであるから、応力波は時刻0.03msでRC版の裏面に到達することになる。しかし、解析結果では応力波がRC版を2往復する時間(0.12ms)においては斜めひび割れは生じることなく、応力波がRC版の断面を数回往復した時間  $t = 0.2 \sim 0.4\text{ms}$  で斜めひび割れが生じていることがわかる。

図-15 に、RC版断面に生じるせん断力分布を示す。時刻0.05msにおいては、中心から150mmの範囲でせん断力が増大し、最大値約200kNを示している。その後、せん断力が分布する範囲が徐々に拡大し、時刻0.1msおよび0.2msにおいては中心から200mmの範囲でせん断力が増大しており、最大値約600kNを示した。その後は、せん断力の分布する範囲が時間の経過とともに支点方向に拡大し、せん断力の最大値も低下している。図-14 に示すRC版断面において斜めひび割れが生じる時刻は0.2ms以降であり、せん断力が最大値を示す時刻と対応している。したがって、本衝突条件においては、衝突荷重が作用することで生じるせん断力によって斜めひび割れが生じたものと考えられる。

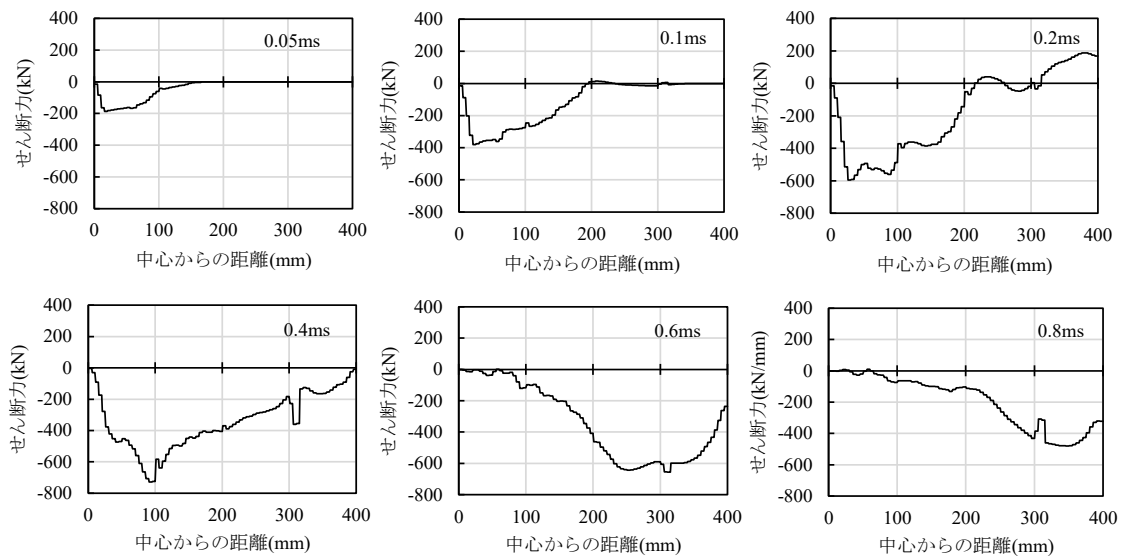


図-15 RC版のせん断力分布

#### 4. 結言

本研究は、衝突荷重を受けるRC版の破壊特性について基礎的な考察を行ったものである。本研究の成果を以下に要約する。

- (1) 衝突荷重、慣性力および支点反力～時間関係から、衝突荷重が作用する間は支点反力が生じることなく、RC版の慣性力と衝突荷重が釣合うことがわかった。
- (2) 衝突によって生じた応力波がRC版の裏面に到達して反射波となる時刻では、RC版の断面に斜めひび割れは生じることなく、応力波が数回伝播する時刻0.2ms～0.4msで斜めひび割れが生じることがわかった。
- (3) RC版断面の破壊性状およびせん断力分布の比較から、RC版断面における斜めひび割れは、衝突荷重が作用することによって生じるせん断力によって生じることがわかった。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所，独立行政法人建築研究所：平成24年に5月6日に茨城県つくば市で発生した竜巻による建築物被害（速報），2012.
- 2) 原子力規制委員会：原子力発電所の竜巻影響評価ガイド，原規技術第1409172号，2013，改正，2014.
- 3) 内閣府（防災担当）：活火山における退避壕等の充実に向けた手引き，2015.
- 4) 土木学会：構造物の衝撃挙動と設計法，構造工学シリーズ6，1994.
- 5) 防衛施設学会局部破壊評価技術部会：衝突作用を受ける構造物の局部破壊に関する評価ガイドライン—設計手法と対策技術—，pp.75-79，2018.
- 6) 片岡新之介，別府万寿博，市野宏嘉：飛来物衝突を受けるRC版の裏面剥離メカニズムに関する研究，構造工学論文集 Vol.65A，pp.876-889，2019.
- 7) Itoh, M., Katayama, M., Mitake, S., Niwa, N., Beppu, M. and Ishikawa, N.: Numerical study on impulsive local damage of reinforced concrete structures by a sophisticated constitutive and failure model, Structures under shock and impact VI, Computational, Mechanics Publications, pp.569-578, 2000.
- 8) 藤掛一典，上林勝敏，大野友則，水野淳，鈴木篤：ひずみ速度を考慮した三軸応力下におけるコンクリートの直交異方性構成モデルの定式化，土木学会論文集，No.669/V-50，pp.109-123，2001.
- 9) Ross, C.A., Thompson, P.Y. and Tedesco, J.W.: Split-hopkinson pressure-bar tests on concrete and mortar in tension and compression, ACI Material Journal, Vol.86, pp.475-481, 1989.
- 10) Johnson, G. R, and Cook, W. H: A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures, Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics, April, 1983.
- 11) Schwer, L: Optional strain-rate forms for the Johnson Cook constitutive model and the role of the parameter  $\epsilon_0^1$ , Proceedings of LS-DYNA Anwenderforum, 2007.
- 12) 日本建築学会：建築物の耐衝撃設計の考え方，丸善出版，2015.
- 13) 石川信隆，大野友則，藤掛一典，別府万寿博：基礎からの衝撃工学，pp.203-222，森北出版株式会社，2008.
- 14) 林卓夫，田中吉之助，衝撃工学，日刊工業新聞社，1988.